

зультате получим  $a_2=18/18=1$ ,  $a_3=18/18=1$  и  $a_4=18/18=1$ . Общее передаточное отношение механизма составило 1088,89021. Это значение в 2,2 раза меньше максимально возможного, равного 2401.

Условие (15) не зависит от соотношений между коэффициентами  $a_i$ . Поэтому первый столбец таблицы может быть реализован при следующих значениях чисел зубьев:  $z_1=18$ ,  $z_2=45$ ,  $z_3=108$  ( $u_1=7$ );  $z_4=25$ ,  $z_5=41$ ,  $z_6=107$  ( $u_2=5,28$ );  $z_7=21$ ,  $z_8=30$ ,  $z_9=81$  ( $u_3=4,85714$ ). При  $u_4=7$  получим общее передаточное отношение механизма, равное 1256,63926. Но такая конфигурация механизма предполагает применение разных ступеней, что иногда может быть невыгодным решением.

**Выводы.** На основе результатов, приведенных в работах [3-4], разработана эффективная программная методика минимизации суммарной массы многоступенчатого планетарного механизма  $\overline{AI} \times \dots \times \overline{AI}$ , учитывающая как условия прочности первой ступени, так и условия равнопрочности внешних зубчатых зацеплений всех его ступеней. При этом поиск оптимального распределения общего передаточного отношения механизма по его ступеням учитывает как ограничения на значения чисел зубьев, так и ограничения конфигурационного характера. Условия равнопрочности внешних зубчатых зацеплений многоступенчатого планетарного механизма  $\overline{AI} \times \dots \times \overline{AI}$  существенно ограничивают возможные варианты его реализации. Особенно это ограничение проявляется для механизма, имеющего все ступени одинаковой конструкции, рассчитанной из условий изгибающей равнопрочности.

**Список литературы:** 1. Проектирование планетарных механизмов, оптимальных по динамическим характеристикам: Учеб. пособие по курсов. и диплом. проектированию / В.А. Ткаченко, В.Т. Абрамов, М.Д. Коровкин. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1983. – 110с. 2. Ткаченко В.А. Планетарные механизмы (оптимальное проектирование) – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2003. – 446с. 3. Абрамов В.Т. Минимизация массы многоступенчатого планетарного механизма // Авиационно-космическая техника и технология. – Вып.33. – С.202207. 4. Абрамов В.Т., Гетья А.Н, Матусевич В.А., Шехов А.В. Методика оптимизации многоступенчатого планетарного механизма по критерию массы // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". – 2009. – Вип.29. – С.45–52.

Поступила в редколлегию 20.04.10

УДК 621.923.5:621.833

**В.С. НАДЕИН**, к.т.н., доцент КНТУ, г. Кировоград

## СИНТЕЗ СТАНОЧНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ПРИ ШЕВИНГОВАНИИ КОЛЕС С МОДИФИЦИРОВАННЫМ УГЛОМ НАКЛОНА ЗУБЬЕВ

Шевингування евольвентних зубчатих коліс не завжди забезпечує якість обробки із-за порушення спряженості верстатного зацеплення. В статті описано спосіб синтезу параметрів спряженого верстатного зацеплення, який забезпечує високу якість обробки стандартним шевером без модернізації верстата.

Shaving of evolvent of gear-wheels not always provides quality of treatment from violation of conjugating of the machine-tool hooking. The method of synthesis parameters of the conjugating machine-tool hooking, which provides high quality of treatment a standard shaver without modernization of machine-tool is described in the article.

Нагрузочная способность зубчатых передач в большинстве случаев существенно определяет технические характеристики машин и зависит от возможности обеспечения технических требований, предъявляемым к ее звеньям, при обработке.

Обеспечение выполнения технических требований к передаче определяется, в основном, возможностями чистовой обработки зубчатого венца образующих эту передачу зубчатых колес. Шевингование, как метод чистовой обработки, применяют чаще других. Однако качество обработанных шевингованием зубчатых колес не всегда удовлетворяет желанию изготовителей.

Известно несколько способов повышения качества обработки эвольвентных зубчатых колес шевингованием, но они достаточно сложны в применении и не всеми производителями могут быть использованы [1-3].

Одной из существенных причин возникновения погрешностей зубчатого венца эвольвентного колеса, как показано в [4], является несопряженность поверхностей зубьев шевера и колеса на всех проходах, предшествующих последнему чистовому. В этой работе предложен способ повышения точности обработки шевингованием и показаны результаты экспериментальной проверки.

Несмотря на то, что результаты этих экспериментов положительные и подтверждают теоретические предпосылки механизма возникновения и развития погрешностей зубчатого венца, практическая реализация способа [5] в настоящее время требует создания нового оборудования или модернизации существующего.

Вместе с тем, учитывая свойства винтового эвольвентного зацепления и его частного применения – процесса шевингования, – можно разработать еще несколько способов шевингования, позволяющих повысить точность обработки.

Если учесть, что шевингование из всех методов чистовой обработки зубчатых колес самый производительный, менее трудоемкий и менее затратный, то разработка способа шевингования, реализация которого возможна на стан-

дартном оборудовании с применением стандартного инструмента, *актуальна* для машиностроения, а аналитические основы способа расширяют теоретическую базу зубообработки. Разработка такого способа является *целью* данного исследования.

Предлагаемый способ основан на следующем.

Производящая поверхность шевера – винтовая эвольвентная поверхность зуба. Для образования режущих кромок боковую поверхность зуба шевера рассекают стружечными канавками. С точки зрения теории резания боковая поверхность канавки – передняя поверхность режущего клина, а его задняя поверхность есть боковая эвольвентная поверхность зуба шевера. Особенностью процесса резания при шевинговании есть то, что в отличие от других процессов резания, точки передней поверхности режущего клина не всегда первыми вступают в контакт с обрабатываемой поверхностью. Известно, что при шевинговании контакт поверхностей зубьев шевера и колеса, точечный без нагрузки, при приложении последней принимают форму, близкую к эллиптической. Центр этого мгновенного пятна контакта находится на линии зацепления. Траектории, которые описывает центр мгновенного пятна контакта на поверхностях зубьев шевера и колес, называются активными линиями. Поскольку режущие кромки на зубьях шевера не совпадают с активными линиями на боковых поверхностях этих же зубьев, то в пределах фазы зацепления одной пары зубьев только одна точка мгновенной обработанной поверхности будет принадлежать эвольвентной поверхности зуба колеса, образованной данной режущей кромкой. Поскольку вертикальная подача на проход создает натяг в зацеплении, возникает усилие на поверхностях зубьев шевера и колеса, находящихся в контакте, и задние поверхности режущих клиньев, расположенные в пределах мгновенного пятна контакта, внедряются в тело зуба обрабатываемого колеса. Относительное перемещение поверхностей зубьев из-за продольного скольжения приводит к срезанию части металла.

Величина внедрения режущего клина в обрабатываемую поверхность при прочих равных условиях определяется упруго-пластической деформацией этой поверхности в пределах касания ее задними поверхностями режущих клиньев. Эксперимент показывает, что площадь касания задних поверхностей режущего клина с обрабатываемой поверхностью много больше площади среза на фазе зацепления.

Если учесть то, что режущая кромка пересекает линию зацепления за фазу зацепления один раз, что величина перемещения режущей кромки в срезаемом материале много меньше перемещения задних поверхностей по обрабатываемой поверхности как в направлении скорости резания, так и в направлении обкатки, можно показать, что поверхность зуба колеса, полученная на предыдущем проходе, играет роль направляющей поверхности для режущей кромки в направлении обкатки на проходе выполняемом. Отсюда следует, что обеспечение сопряженности поверхностей зубьев шевера и колеса при свободном обкате позволит выполнить закон движения эвольвентного винтового зацепления. А это создает предпосылки, позволяющие повысить точность обработки.

Суть этого способа заключается в том, что в станочном зацеплении создаются параметры, обеспечивающие сопряженность поверхности зубьев шевера и колеса на каждом проходе без модернизации зубошевинговального станка, необходимой для реализации способа, описанного в [5].

Особенность геометрии зубьев колеса, нарезанного под шевингование, состоит в том, что для оставления припуска  $\Delta S$  на обработку зубья нарезают червячными фрезами с уменьшенной на  $2\Delta S$  толщиной зуба по делительной прямой производящего контура. Увеличенная в связи с этим толщина зуба колеса при неизменных диаметральных его размерах существенно изменяет характер станочного зацепления, особенно на черновых проходах. Как показано в работе [5], при шевинговании колеса, зубья которого предварительно были шлифованы, на первых четырех проходах погрешности венца увеличились в 50...80 раз. Особенно характерным в этих результатах есть то, что на первом проходе величину погрешности направления зуба практически можно считать углом наклона зуба косозубого колеса, созданного на этом проходе, хотя обрабатывается колесо прямозубое.

При наличии на боковых сторонах припуска под шевингование, обрабатываемое колесо нужно рассматривать как колесо с увеличенной толщиной зуба, что позволяет ввести коэффициент изменения толщины зуба, как это принято в конических передачах [6]. Величина коэффициента увеличения толщины зуба колеса

$$x_{\tau} = \frac{2\Delta S}{m_n}, \quad (1)$$

где  $x_{\tau}$  – коэффициент увеличения толщины зуба;  $\Delta S$  – величина припуска под шевингование на сторону зуба колеса;  $m_n$  – модуль нормальный.

При наличии у колеса смещения исходного контура  $x_1$ , предусмотренного конструкцией передачи, суммарный коэффициент смещения

$$x_{1\Sigma} = x_1 + x_{\tau} \quad (2)$$

где  $x_{1\Sigma}$  – суммарный коэффициент смещения колеса.

У шевера на боковых сторонах зуба оставляют припуск на переточку. В соответствии с величиной этого припуска изменяется и высота зуба шевера. В связи с этим изменениями размеров зуба шевера можно представить как косозубое колесо со смещением исходного контура  $x_0$ . Будучи соединенным в станочном зацеплении в зубчатую пару шевер и колесо образуют винтовую эвольвентную передачу. Естественно потребовать, чтобы в станочном зацеплении выполнялись условия, обеспечивающие правильное сопряжение поверхностей зубьев, что устранил возникновение и развитие погрешностей зубчатого венца обрабатываемого колеса. В связи с этим передачу шевера-обрабатываемое колесо в станочном зацеплении нужно рассматривать как передачу со смещением, коэффициент суммы смещений которой на первом черновом проходе будет равен:

$$x_{\Sigma 01} = x_1 + x_r + x_0, \quad (3)$$

где  $x_{\Sigma 01}$  – коэффициент суммы смещений.

Угол скрещивания осей шевера и колеса равен алгебраической сумме углов наклона зубьев последних на начальных цилиндрах в момент окончания обработки и величина его не изменяется за время обработки.

Из-за увеличения начальных углов наклона зубьев угол скрещивания должен быть изменен на величину изменения этих углов на первом проходе. Поскольку этого сделать (по условиям задачи исследования) нельзя, то нарушается сопряженность станочного зацепления, и, как следствие этого, вступает в действие механизм создания погрешностей обработки.

Для устранения этого нужно изменить угол наклона зуба колеса-заготовки на величину, соответствующую изменению величины межосевого расстояния на первом проходе, так как изменить угол наклона зуба шевера нельзя.

Для нахождения угла наклона зуба колеса заготовки воспользоваться условием постоянства передаточного отношения в станочном зацеплении на каждом проходе. Сопряженность станочного зацепления будет гарантирована, если на каждом проходе величины углов  $\beta_{oi}$ ,  $\Sigma_{01}$  будут соответствовать величине межосевого расстояния  $a_{oi}$ . Выполнив соответствующие преобразования при постоянном угле скрещивания осей и угле наклона зуба шевера, получим:

$$\beta_{1\text{заг}} = \beta_1 + \Delta\Sigma_{01}, \quad (3)$$

где  $\beta_{1\text{заг}}$  – угол наклона зуба колеса-заготовки;  $\Delta\Sigma_{01}$  – величина изменения угла скрещивания осей, соответствующая изменению межосевого станочного расстояния

$$\Delta\Sigma_{01} = \frac{2 \cos^2(\Sigma_{01} - \beta_1)}{m_n z_0 \sin(\Sigma - \beta_1)} \Delta a_{01}, \quad (4)$$

где  $m_n$  – нормальный модуль зацепления;  $z_0$  – число зубьев шевера;  $\Delta a_{01}$  – величина изменения станочного межосевого расстояния на первом проходе,

$$\Delta a_{01} = \sum_1^i S_{pi} + c, \quad (5)$$

где  $i$  – число черновых и чистовых проходов при обработке;  $S_{pi}$  – радиальная подача на каждом проходе;  $c$  – величина увеличения межосевого станочного расстояния для исключения заклинивания при наличии биения зубчатого венца колеса-заготовки,  $c = 0,05$  мм.

Для определения параметров станочного зацепления на первом проходе нужно знать начальный угол станочного зацепления, так как поверхность зубца, полученная на предшествующей зуборезной операции будет направляющей на первом проходе при шевинговании. Удобнее искать нормальный угол станочного зацепления. Для этого используем приведенное станочное зацеп-

ление. Характерным для обоих станочных зацеплений будет то, что начальный угол зацепления в них и коэффициенты смещения исходного контура шевера и колеса будут одинаковы. Учитывая это, из уравнения эквивалентного станочного зацепления можно получить зависимость для определения начального нормального станочного угла зацепления на первом проходе

$$\text{inv } \alpha_{wn01} = \frac{2(x_1 + x_0 + x_r) \text{tg } \alpha_0 \cos^3 \beta_0 \cos^3 \beta_1}{z_0 \cos^3 \beta_1 + z_1 \cos^3 \beta_0} + \text{inv } \alpha, \quad (6)$$

где  $x_0$  – коэффициент смещения исходного контура шевера;  $z_0, z_1$  – числа зубьев шевера и колеса соответственно;  $\beta_0, \beta_1$  – делительные углы наклона зубьев шевера и колеса соответственно;  $\alpha$  – угол профиля исходного контура.

Зная углы  $\alpha_{wn01}, \beta_{w0}, \beta_{w1}$  можно определить все остальные параметры станочного зацепления по известным зависимостям.

Экспериментальная проверка предложенного способа синтеза станочного зацепления была проведена на шестернях насоса НШ-10 в условиях завода "Гидросила" (г. Кировоград). Зубчатый венец окончательно обработанной шестерни имеет параметры  $m_n = 3$  мм;  $z_1 = 10$ ;  $x_1 = 0,3445$ ;  $\beta_1 = 0$ . Зубчатый венец шестерни-заготовки выполняется с углом  $\beta_{1\text{заг}} = 0,4495^\circ$  при увеличении межосевого расстояния на первом проходе на 0,18 мм. После обработки шестерен стандартным шеве́ром класса точности В измеренные погрешности составили: направления зуба 1...2 мкм; радиальное биение 8...6 мкм; колебание длины общей нормали 6...4 мкм; погрешность профиля 0,01 мм.

Таким образом, приведенные выше рассуждения позволяют сделать **ВЫВОДЫ** о том, что:

1. Выполнение колеса-заготовки с измененным углом наклона зуба, соответствующим изменению станочного межосевого расстояния, обеспечивает сопряженность станочного зацепления на каждом проходе;
2. Использование модифицированного предложенным способом колеса-заготовки позволяет существенно повысить точность обработки зубчатого венца без существенных затрат на производство.

**Список литературы:** 1. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес. – Львов: Вища школа, 1977. – 168с. 2. Калашников С.Н. Шевингование зубчатых колес / С.Н.Калашников, А.С. Калашников. – М.: Высшая школа, 1985. – 272с. 3. Петрухин С.С. Классификация видов шевингования в области технологии машиностроения / С.С. Петрухин, Н.Т. Ананьев // Прогрессивная технология машиностроения. – Тула: ТулПИ, 1970. – Вып. IV. – С. 71–77. 4. Надеин В.С. Механизм возникновения и развития погрешностей зубчатого венца при шевинговании / В.С. Надеин, Хамдан Мухаммед // Проблемы автоматизации и энергообеспечения в машиностроении. Сб. статей. – Кировоград, 1995. – С. 61–66. 5. Хамдан Мухаммед. Определение погрешности зубчатого венца по проходам при шевинговании // Проблеми розробки, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Зб. наук. пр. – Кіровоград, 1995. – С. 97–100. 6. Болотовский И.А. Прямозубые конические передачи: Справочник / И.А. Болотовский, Б.И. Гурьев, В.Э. Смирнов, Б.И. Шендрей. – М.: Машиностроение, 1981. – 104с.

Поступила в редколлегию 09.04.10